

А. М. СИМОНЯН

К ВОПРОСУ О НЕИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ
ХРОМО-НИКЕЛЕВОЙ СТАЛИ

Как известно, многие конструкции из нержавеющей сталей эксплуатируются в условиях переменных во времени температур и напряжений. В связи с этим актуальным представляется вопрос о предсказании ползучести в нестационарных условиях. В работах [1–5] приведены результаты исследований ряда металлов при постоянных напряжениях и непрерывно или циклически изменяющихся температурах в сравнении с данными гипотезы уравнения состояния. В настоящей работе делается попытка сформулировать некоторые теоретические предпосылки неизотермической ползучести в применении к схеме Эндерейда [6], а также проверить их экспериментально для случая ступенчато-изменяющихся температур одноосно растянутых цилиндрических образцов из стали Х18Н10Т. В качестве теоретических предпосылок здесь взяты: 1) гипотеза уравнения состояния [7, стр. 196], 2) вариант теории Малинина-Хажинского [8], 3) видоизмененное уравнение величинной теории наследственности.

1. Методика экспериментальных исследований

Опыты проведены на испытательной машине Zst 502.10 Рауэнштайн. Образцы \varnothing 8 мм выточивались из прутков \varnothing 15 мм стали Х18Н10Т при непрерывной подаче масла на обрабатываемую поверхность с целью уменьшения нагрева образца в процессе его обработки. Точность измерения деформаций, обеспечиваемая с помощью оптического устройства, составляет $0,5 \cdot 10^{-4}$. Эксперименты производились при „ступенчатом“ изменении температур, при этом температура на каждой ступени была колеблющейся ± 2 С с периодом около 2 минут. Как показано в работе [9], факт таких незначительных колебаний температуры несущественно отражается на ползучести металлов. „Ступенчатое“ изменение температуры в печи осуществлялось при постоянном напряжении и в течение 20–30 минут, при этом максимальная скорость изменения температуры не превышала 4°/мин.

При одновременном „ступенчатом“ изменении напряжений и температур изменение напряжений при их уменьшении осуществлялось до изменения температуры, а при их увеличении — после. Изменение напряжений осуществлялось плавно в течение $\sim 0,5$ минут при недопущении динамических аффектов.

Вследствие того, что в процессе изменения температуры образец, как, впрочем, и зажимные измерительные шины, претерпевал деформации теплового расширения, отдельно снималась кривая изменения отчета у ненагруженных образцов при соответственном изменении температуры: действительные кривые ползучести определялись путем вычитывания этих изменений от экспериментальных отчетов ползучести. Приведенные экспериментальные кривые являются усредненными из 8-12 испытаний образцов.

2. О ползучести при постоянных напряжениях и температурах

Исследования проведены при температурах 600–700°С и напряжениях 0,15–0,25 R (R – кратковременная прочность при 20°С и при скорости деформирования 4%/мин, равная 6200 кг/см²). Почти во всех проведенных опытах отчетливо проявлялись первые две стадии ползучести. Как и в [10], наиболее точным аналитическим представлением деформации в зависимости от времени оказывается следующее:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \beta(1 - e^{-\alpha t}) + \alpha t \quad (2.1)$$

где ε_0 , β и α являются зависимыми от температуры и действующего напряжения, а γ – от температуры.

Уравнение (2.1) имеет тот недостаток, что обобщение его на случай переменных напряжений и температур, согласно рассматриваемым ниже теориям, оказывается затруднительным. Этого недостатка лишено уравнение (2.2)

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \frac{\beta}{\ln\left(1 + \frac{\beta\gamma}{\alpha}\right)} \ln\left[\left(1 + \frac{\beta\gamma}{\alpha}\right)^{1 + \frac{\alpha t}{\beta}} - \frac{\beta\gamma}{\alpha}\right] \quad (2.2)$$

Кривые ползучести, построенные согласно (2.1) и (2.2), весьма мало отличаются друг от друга, а начальная и установившаяся скорости, а также общая затухающая доля деформации ползучести (при $\alpha \neq 0$) у них совпадают и соответственно равны

$$\left. \frac{d\varepsilon}{dt} \right|_{t=0} = \alpha + \beta\gamma, \quad \left. \frac{d\varepsilon}{dt} \right|_{t \rightarrow \infty} = \alpha, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} [\varepsilon_c(t) - \alpha t] = \beta$$

Параметры ползучести α , β и γ для каждой рассматриваемой пары значений T и σ определялись из экспериментальных кривых ползучести при постоянных T и σ следующим образом. Параметр α брался равным угловому коэффициенту соответственной кривой во второй стадии ползучести. Параметр β брался равным отрезку, отсекаемому от оси ординат касательной к кривой ползучести во второй ее стадии. Параметр γ определялся путем подбора.

3. О теоретических предпосылках

Теоретические предпосылки здесь рассматриваются в свете обобщения уравнения ползучести при постоянных температуре и осевом растяжении на случай переменных напряжений и температур.

а) *Гипотеза уравнения состояния*. Согласно гипотезе уравнения состояния [7], между скоростью ползучести $\frac{d\varepsilon_c}{dt}$, деформацией ползучести ε_c , температурой T и напряжением σ существует однозначная связь

$$\Phi\left(\frac{d\varepsilon_c}{dt}, \varepsilon_c, T, \sigma\right) = 0 \quad (3.1)$$

где Φ — функция четырех аргументов, берущихся соответствующими рассматриваемому моменту времени.

В применении к (2.2) уравнение (3.1) запишется так

$$\frac{d\varepsilon_c}{dt} = \alpha + \beta_1 \left(1 + \frac{\beta_2}{\alpha}\right) \varepsilon_c^{-\beta_1} \quad (3.2)$$

При условиях

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_0, & T(t) &= T_0 & \text{при } t < t_0 \\ \sigma(t) &= \sigma_1, & T(t) &= T_1 & \text{при } t > t_0 \end{aligned} \quad (3.3)$$

из уравнения (3.2) получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_c(t) &= \frac{\beta_1}{\ln\left(1 + \frac{\beta_1 \gamma_1}{\alpha_1}\right)} \ln \left\{ \left(1 + \frac{\beta_1 \gamma_1}{\alpha_1}\right)^{\frac{\varepsilon_c(t_0)}{\beta_1}} + \right. \\ &\left. + \frac{\beta_1 \gamma_1}{\alpha_1} \left| \left(1 + \frac{\beta_1 \gamma_1}{\alpha_1}\right)^{\frac{\alpha_1(t-t_0)}{\beta_1}} - \frac{\beta_1 \gamma_1}{\alpha_1} \right| \right\}, \quad t > t_0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

где β_1 , γ_1 и α_1 берутся соответствующими β , T , а $\varepsilon_c(t_0)$ — деформация ползучести при σ_0 и T_0 , определяемая по формуле (2.2).

б) *Вариант теории Малинина-Хажинского [8]*. Согласно этой теории, действующее напряжение $\sigma(t)$ представляется в виде

$$\sigma(t) = s(t) + \rho(t) \quad (3.5)$$

где $s(t)$ — активное напряжение, определяющее скорость деформации в рассматриваемый момент, $\rho(t)$ — дополнительное напряжение, увеличивающееся с ростом деформаций ползучести

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon_c}{dt} &= F(s, T) \\ d\rho &= A(T, s, \varepsilon_c) d\varepsilon_c \end{aligned} \quad (3.6)$$

Попытки конкретизировать функции F и A так, чтобы при постоянных температуре и напряжении уравнения (3.5) и (3.6) вырождались в (2.1) или (2.2), не приводят к успеху.

В работе [12] приводятся функции F и A , позволяющие получить аналитическое выражение для обратной ползучести, для построения же кривой ползучести при постоянных напряжениях авторы предлагают шаговый метод.

Рассмотрим уравнения (3.7)

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_c}{\partial t} &= B(z, T)(z - \rho) && \left(\text{случай нагрузки} \right. \\ d\rho &= A(z, T)[z - \rho - k(z, T)] d\varepsilon_c && \left. \text{ния } \frac{\partial \sigma}{\partial t} > 0 \right) \end{aligned} \quad (3.7)$$

отличающиеся от (3.6) тем, что здесь скорость ползучести определяется как активной составляющей, так и всем напряжением. Принимая

$$A = \frac{\ln\left(1 + \frac{\beta\gamma}{\alpha}\right)}{\beta}, \quad B = \frac{\alpha + \beta\gamma}{\alpha}, \quad k = \frac{\alpha}{\alpha + \beta\gamma}$$

после интегрирования (3.7) для постоянных σ и T получим (2.2). При условиях (3.3), в предположении $\varepsilon_1 > \varepsilon_0$, из (3.7) для $t > t_0$ получим

$$\begin{aligned} \varepsilon_c(t) &= \frac{1}{A_0} \ln\left(\frac{1}{k_0} e^{A_0 B_0 \sigma k_0 t} - \frac{1}{k_0} - 1\right) + \\ &+ \frac{1}{A_1} \ln\left[\frac{\varepsilon_1 - \rho_0}{k_1 \varepsilon_1} (e^{A_1 B_1 \sigma k_1 (t-t_0)} - 1) + 1\right] \end{aligned} \quad (3.8)$$

где

$$\rho_0 = \frac{\sigma_0 \beta_0 \gamma_0}{\alpha_0} \left[1 + \frac{\beta_0 \gamma_0}{\alpha_0} + \frac{1}{\left(1 + \frac{\beta_0 \gamma_0}{\alpha_0}\right)^{\frac{\alpha_0}{\beta_0}} - 1} \right]^{-1}$$

а индексы при A , B , k , α , β и γ взяты соответственными (3.3).

В случае разгрузки уравнения ползучести запишем в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_c}{\partial t} &= B_m (\sigma_m - \rho_m)^{1-\gamma} |\sigma - \rho| \operatorname{sign}(\sigma - \rho) && \left(\text{случай} \right. \\ d\rho &= A_p \left[1 - \left(\frac{k}{1-k} \left| \frac{\rho}{\sigma - \rho} \right| \right)^\gamma \operatorname{sign}\left(\frac{\rho}{\sigma - \rho}\right) \right] d\varepsilon_c && \left. \text{разгрузки} \right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

где

$$A_p = A_m \frac{\sigma_m (1 - k_m) - \rho_m}{1 - \left(\frac{k_m}{1 - k_m} \frac{\rho_m}{\sigma_m - \rho_m} \right)^\gamma}$$

B_m , A_m , k_m и ρ_m — значения B , A , k и ρ в момент, когда напряжение σ достигает своего максимального значения σ_m . Уравнения (3.9) интегрируются для полной разгрузки ($\sigma_1 = 0$), в остальных же случаях теоретические кривые строятся шаговым методом.

в) *Видоизмененное уравнение нелинейной теории наследственности.* Распространяя общепринятые принципы построения формулы наследственной ползучести для случая переменных температур на (2.1), получим

$$\varepsilon_s(t) = \int_0^t \alpha[\varepsilon(\tau), T(\tau)] d\tau + \int_0^t \beta[\varepsilon(\tau), T(\tau); |T(\tau)|] e^{-\gamma|T(\tau)|^{b-\tau}} d\tau \quad (3.10)$$

Согласно (3.10), при понижении температуры в процессе испытания на ползучесть должны произойти деформации обратной ползучести, что на самом деле не имеет места и приводит к существенным расхождениям с экспериментальными данными [5]. Вследствие этого уравнение (3.10) заменим нижеследующим:

$$\varepsilon_s(t) = \int_0^t \alpha[\varepsilon(\tau), T(\tau)] d\tau + \int_0^b \beta[\varepsilon(\tau+t-\theta), T(\tau+t-\theta); |T(\tau+t-\theta)|] e^{-\gamma|T(\tau+t-\theta)|^{b-\tau}} d\tau \quad (3.11)$$

где θ —сумма промежутков времени, в течение которых температура в образце не меньше максимально достигнутой к этому времени: иначе говоря, начиная с момента, когда температура достигла наибольшего значения и стала уменьшаться, второй член в (3.11) перестает изменяться во времени ($d\theta = 0$), и деформации затухающей ползучести „замораживаются“ вплоть до достижения температурой вновь этого же наибольшего значения, после чего $d\theta = dt$.

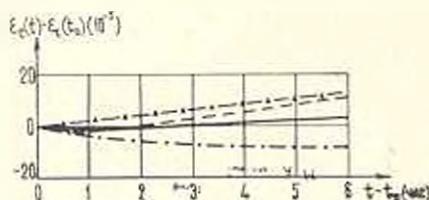
4. Результаты экспериментальных исследований

Как указывалось в [7], рекомендуемым способом проверки теорий ползучести являются испытания на ползучесть при ступенчатом изменении напряжений и температур. При этом наиболее контрастные результаты ожидаются при уменьшении напряжения и одновременном повышении температуры, и наоборот.

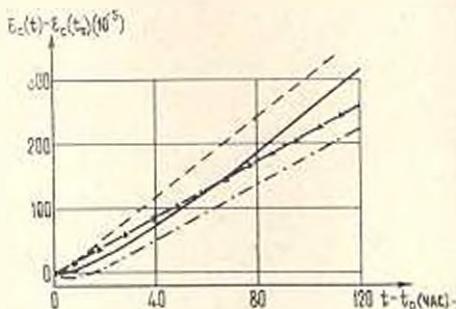
Ниже приведены экспериментальные данные о ползучести при двухступенчатом изменении напряжений и температур (сплошные линии) в сравнении с кривыми, построенными согласно (3.4) (штриховые линии с треугольниками), (3.11) (штриховые линии с пунктирами) и (3.8) или (3.9) (штриховые линии). При этом значения β , γ и α , фигурирующие в этих формулах, брались из соответствующих экспериментов при постоянных напряжениях и температурах. Построение же теоретической кривой, согласно (3.9), в которой принималось $\gamma = 0.2$, осуществлялось следующим образом. Начиная с момента t_0 , ось времени делилась на получасовые промежутки, в течение которых приближенно скорость ползучести принималась постоянной. Затем в момент t_0 определялось $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$ при $\sigma = \sigma_m$ и в конце 1-го промежутка вы-

числялось приращение ρ по второй формуле (3.9), где дифференциалы заменялись приращениями; в начале второго промежутка принималось новое ρ с учетом приращения в первом промежутке и определялось $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$, соответствующее второму промежутку. Эта операция осуществлялась последовательно для каждого промежутка вплоть до момента t . Кривая же строилась по наклону касательной $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$.

На фиг. 1 и 2 приведены данные о ползучести при температуре 700 С и при напряжении 0.15 R после длительной ползучести при 650 С и при напряжении 0.2 R*. Как показано на фиг. 1, в течение почти одного часа после изменения напряжения и температуры имеет место обратная ползучесть, и это совпадает с предсказанием (3.9), в то время как согласно гипотезе состояния (3.4) обратная ползучесть отрицается и предсказывается течение с постоянной скоростью, соответствующей второй стадии ползучести при действующих напряжении и температуре. Согласно наследственной теории (3.11), обратная ползучесть должна была происходить примерно 6 часов с достижением значительно больших деформаций по отношению к действительным.



Фиг. 1



Фиг. 2

Как следует из данных фиг. 2, на второй ступени нагружения и нагрева имеет место асимптотическое стремление скорости ползучести к своему предельному наибольшему значению; это предсказывается и каждой из рассматриваемых теорий, однако, согласно (3.4) и (3.11), предельное значение скорости ползучести равно $\alpha(\sigma_1, T_1)$, в то время как, согласно (3.9), оно достигает $\alpha(\sigma_1, T_1) \left[\frac{\alpha(\sigma_0, T_0)}{\alpha(\sigma_1, T_1)} \right]^{0.8} \times$

$$\times \left[\frac{\sigma_1}{\sigma_0} \cdot \frac{\alpha(\sigma_0, T_0) + \beta(\sigma_0, T_0) \gamma(T_0)}{\alpha(\sigma_1, T_1) + \beta(\sigma_1, T_1) \gamma(T_1)} \right]^{0.2}$$

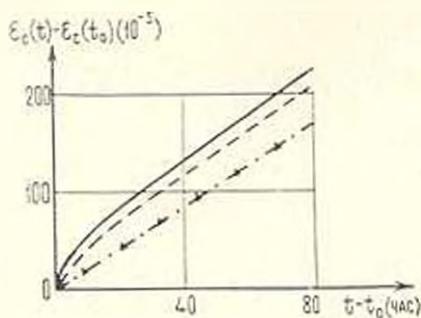
превосходящее $\alpha(\sigma_1, T_1)$, причем предельное значение скорости ползучести, согласно (3.9), оказывается значительно ближе к экспериментальному. Отметим также, что по вся-

* Под термином „длительная ползучесть“ здесь подразумевается практическое достижение второй стадии ползучести.

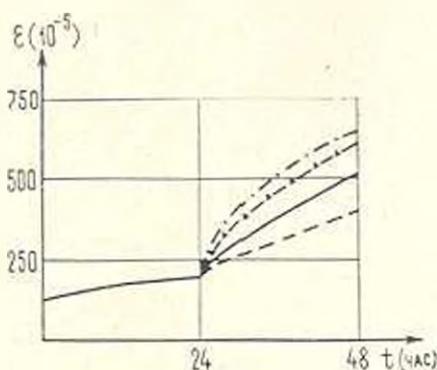
ком случае в пределах 100 часов после изменения напряжения и температуры, как видно из фиг. 2, наименьшее абсолютное расхождение с экспериментальной кривой дает теоретическая кривая гипотезы уравнения состояния (3.4), однако при более длительной ползучести предпочтение можно дать уравнениям (3.9).

На фиг. 3 приведены данные о ползучести при напряжении $0.2R$ и температуре 650°C после длительной ползучести при напряжении $0.15R$ и температуре 700°C . Предсказание о практически постоянной скорости ползучести не подтверждается экспериментами. Из рассмотренных теорий возирает I стадии ползучести описывается лишь уравнениями (3.8), дающими наименьшее расхождение с экспериментальной кривой. Величина установившейся скорости ползучести, согласно рассмотренным теориям, определяется здесь лишь значениями действующих на данной ступени напряжения и температуры, что подтверждается экспериментом.

Согласно (3.8), величина скорости ползучести тем ближе к значению установившейся скорости, чем меньше различие между ρ и $\rho_0 = (1 - k)$, независимо от того, при каких условиях происходило изменение ρ , что, несомненно, является определенным допущением. На наш взгляд, допущение это будет наиболее контрастно проявляться при изменении температуры, но при постоянном напряжении; в этом случае изменение дополнительного напряжения ρ определяется лишь изменением убывающей функции $k(T)$.



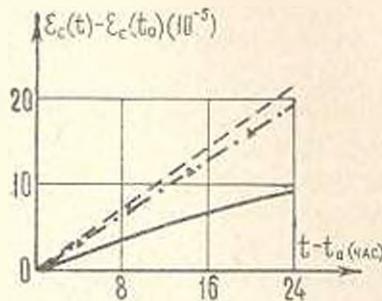
Фиг. 3



Фиг. 4

На фиг. 4 приведены данные о ползучести при напряжении $0.25R$ и повышении температуры от 600° до 650°C . Кривые ползучести, построенные согласно наследственной теории и гипотезе уравнения состояния, как это систематически имело место после догрузки при изотермической ползучести [8], дают расхождение с экспериментальной кривой в сторону большего роста скорости ползучести. Кривая ползучести, построенная согласно (3.8), дает, наоборот, примерно такое же расхождение с экспериментальной кривой, но в сторону меньшего роста скорости ползучести.

Исследования ползучести при 600 С и при напряжении 0.25 R после 24-часовой ползучести при 650 С и при том же напряжении иллюстрированы на фиг. 5, откуда видно, что обратная ползучесть здесь не имеет места. Все рассмотренные теории предсказывают примерно



Фиг. 5

и два раза большую деформацию ползучести, чем получено экспериментально, однако и сами деформации ползучести здесь весьма малы.

В заключение отметим, что, судя по сравнению приведенных экспериментальных данных с теоретическими, видимо, некоторое предпочтение можно дать варианту теории Малинина-Хажинского.

Институт механики
АН Армянской ССР

Поступила 15 VII 1971

Ա. Մ. ՍԻՄՈՅԱՆ

ԿՐՈՄԱԿՆԻՍՏՆԵ ՊՈՂՊՈՒՏԻ ՈՉ ԻՋՈՐՆԵՐՄ ՍՈՂԵՐ ՀՍՐՅՈՒ ԽՐՈՄԻ

Ա մ փ ո փ ո ս ը

Աշխատանքում դիտարկվում են ոչ իզոթերմ սողքի տարրեր տեսափյունների էնդրեյզի սխեմայի կիրառման մեջ:

Զժանդատվող պողպատի համար բերվում է տեսական և էքսպերիմենտալ տվյալների համեմատում բարձուն և ջերմաստիճանի միաստիճանային փոփոխման դեպքում:

ON NON-ISOTHERMAL CREEP OF CHROME-NICKEL STEEL.

A. M. SIMONIAN

S u m m a r y

The study is concerned with various theoretical premises of non-isothermal creep in terms of the Andrade scheme. Theoretical and experimental data for the case of single-step variations in stress and temperature are compared.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Иванова Г. М.* Ползучесть сплава ЭИ-137Б при переменных температурах. Известия АН СССР, ОТН, 4, 1958.
2. *Tatra S., Ohnami M.* Creep under rapid cycling temperatures. Proc. 3-rd Japan Congr. Testing Mater. Kyoto, 1960.
3. *Nishihara T., Tatra S., Tanaka K., Ohnami M.* Experimental study on the relationship between creep rate determining factors of low carbon steel. Techn. Rep. Eng. Res. Inst. Kyoto Univ., т. 8, № 2, 1958.
4. *Dorn J. E.* Some fundamental experiments on high-temperature creep. Journ. Mech. Phys. Solids, т. 3, № 2, 1955.
5. *Симолян А. М.* Исследование ползучести стали Х18Н10Т при переменных температурах. Известия АН АрмССР, Механика, т. XXV, № 2, 1972.
6. *Кичанов А. М.* Теория ползучести. Физматгиз, М., 1960.
7. *Работнов Ю. Н.* Ползучесть элементов конструкции. Наука, М., 1966.
8. *Малинин Н. Н., Хажинский Г. М.* К построению теории ползучести с анизотропным упрочнением. МТТ, № 3, 1969.
9. *Наместников В. С.* О ползучести при переменной температуре в условиях сложного напряженного состояния. ИМТФ, № 4, 1964.
10. *Симолян А. М.* Экспериментальное исследование ползучести нержавеющей стали Х18Н10Т при 600 С. Известия АН АрмССР, Механика, т. XXII, № 6, 1969.
11. *Гарофало Ф.* Звязи ползучести и длительной прочности металлов. Металлургия, М., 1968.
12. *Бойков В. И., Бойцов Ю. И., Малинин Н. Н., Хажинский Г. М.* Высокотемпературная ползучесть сплава ЭИ-437Б при различных режимах нагружения. Известия ВУЗов, Машиностроение, № 9, 1969.